

Список литературных источников

1. Васильева А.В., Быков Д.С., Тарасьев А.А. Компьютерная программа моделирования миграционного движения и его экономических эффектов // Журнал экономической теории. 2014. №3. С. 74-84.
2. Черешнев В.А., Васильева А.В. Модельный комплекс прогнозирования взаимообусловленного развития миграционных процессов и рынка труда в регионе // Экономика региона. 2013. № 3 (35). С. 272-281.
3. Васильева А.В., Тарасьев А.А. Динамическая модель трудовой миграции: построение и реализация // Экономика региона. 2012. № 4 (32). С. 140-148.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ И ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 519.6

Филимонов М.Ю.^{1,2}, Ваганова Н.А.¹, Гусарова В.В.^{1,2}, Халтурина Т.Ю.²

¹ Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН,
620990, Россия, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 16

² Уральский федеральный университет им. Первого Президента России
Б.Н.Ельцина, 620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Аннотация. Добыча нефти и газа на северных нефтегазовых месторождениях, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП), имеет свою специфику и оказывает существенное влияние на деградацию ММП из-за выделения тепла от горячей нефти, нагревающей трубы в скважинах, что в свою очередь может приводить к авариям и даже к разрушению скважин. Моделирование таких процессов с учетом фазовых превращений приводит к рассмотрению задач тепломассопереноса в сложных трехмерных средах. Если не учитывать фазовый переход, то могут, в частности, возникнуть задачи, связанные с оптимальным проектированием геотермальных месторождений. Обе эти задачи требуют больших вычислительных мощностей и затрат машинного времени на проведение численного моделирования по долгосрочному прогнозированию распространения тепловых полей в неоднородном грунте со сложной литологией. В предложенной работе рассматриваются результаты, направленные на разработку методик, ориентированных на облачные технологии и многопроцессорные ЭВМ, для расчета тепловых полей как в вечной мерзлоте, от различных технических систем, влияющих друг на друга, так и при проектировании оптимальных геотермальных циклических систем.

Ключевые слова: Задачи тепломассопереноса, облачные технологии, моделирование.

Abstract. Design and operation of oil, gas, and geothermal fields generates a number of problems that require massive computations, related with series of numerical simulations in a complex three-dimensional region of heat and mass transfer processes. Mathematical formulation of some of these problems for northern

oil and gas fields are presented in [1-3] for the problems associated with using geothermal heat sources are in [4]. In the presented paper the results are considered which deal with the methods focused on cloud computing and multiprocessor computations to simulations of thermal fields in permafrost around of various technical systems influenced each other, which can be a heat source (surface and underground) and a cold source (in the soil).

In Russia, permafrost takes place about 60% of the total area, these areas are extremely important for economy, because produces about 93% of Russian natural gas and 75% of oil. Thawing of ice-saturated rocks due to global warming, or various technological impacts, is accompanied by subsidence of earth's surface and development of dangerous cryogenic geological processes, which called thermokarst. Over the last 10 years, only in the cities of Norilsk area about 50 high-rise buildings are demolished due to weakened of foundations. In 2007-2009, on the territory of Yamburg gas condensate field approximately 8000 pillars of pipelines are cut off because of frost heave. In permafrost about 40% of all engineering structures are subjected to a strain. According to foreign sources, annually Gazprom spends more than \$1.9 billion USD to restore infrastructure affected by permafrost thawing. It was found that not only climate change, but human activities lead to permafrost degradation and it leads to big efforts to recovery the infrastructure and environment. As a rule these three-dimensional problems have to be considered in different scales of various physical and climatic factors that have to be included in the mathematical model with no popular simplification of some researchers.

The paper considers a model which takes into account the following factors: emissivity, leading non-linear boundary conditions at the surface; various thermal parameters of soils constituting the permafrost, changing not only in the vertical plane; seasonal fluctuations in air temperature in the area (in summer time there is a seasonal thawing of the upper layer of soil, in winter there is freezing); possible phase transition; engineering characteristics of technical systems (various insulating materials, seasonal cooling devices used for thermal stabilization of soil), etc. The developed model, cloud environment and software package "Wellfrost" (State Registration Number 2012660988, Dec. 4, 2012) was corrected according to monitoring data for technical systems (such as production and injection wells) and permafrost by "Nordeco Eurasia" company.

The computational core (software package «Wellfrost»), included in the cloud environment, from 2010 was tested in 8 oil and gas fields located in permafrost zone and is in a good (about 5%) agreement with the experimental data.

The calculations showed that for solving such problems powerful multiprocessor computers are required and it is necessary to develop a user-friendly interface for cloud computing for a specific range of applications. The considered models may include problems associated with evaluation of the effects of climate change and other important problems, for example, effective extraction of geothermal heat (software package GeoTerm, State Registration Number 2014616246, Feb. 10, 2014).

Keywords: Heat and mass transfer problems, cloud technologies, numerical simulation.

Введение

Многолетнемерзлые породы, имеющие отрицательную температуру ниже зоны сезонного протаивания грунта, занимает около 25% всей суши земного шара (в основном это Аляска, части северных территорий Канады, России, высокогорные области Китая) и очень подвержены внешним воздействиям. В России ММП занимают общую площадь 10 млн. км², что составляет около 60% всей территории. Эти территории чрезвычайно важны для российской экономики, так как здесь добывается около 93% российского природного газа и 75% нефти. Установлено, что не только климатические изменения, но и хозяйственная деятельность человека приводит к деградации ММП, в результате которой тратятся большие средства на восстановление инфраструктуры. Оттаивание насыщенных льдом пород из-за потепления климата, или различных техногенных воздействий, будет сопровождаться просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных геологических процессов, называемым термокарстом. За 10 последних лет только в городах Норильского района вследствие уменьшения несущей способности фундаментов снесено около 50 многоэтажных домов. На территории Ямбургского газоконденсатного месторождения из-за морозного пучения в 2007 – 2009 г.г. срезано около 8 тысяч опор для газопроводов. Подвергаются деформации около 40% всех инженерных сооружений в криолитозоне. По зарубежным данным, Газпром ежегодно теряет более 1,9 млрд. долларов США на восстановление инфраструктурных объектов, пострадавших в результате растепления ММП. Установлено, что не только климатические изменения, но и хозяйственная деятельность человека приводит к деградации ММП, в результате которой тратятся большие средства на восстановление инфраструктуры.

Особенностью решения таких трехмерных задач является большая размерность, учет различных физических и климатических факторов, которые должны обязательно присутствовать в математической модели, чем многие исследователи часто пренебрегают. В работе рассматриваются модели, в которых учтены следующие факторы: лучистое излучение, приводящее к нелинейным краевым условиям на дневной поверхности; различные теплофизические параметры грунтов, составляющих вечноммерзлые породы, изменяющихся не только в вертикальной плоскости; сезонные колебания температур воздуха в исследуемом районе (в летнее время происходит сезонное оттаивание верхнего слоя грунта, в зимнее время наблюдается обратный процесс); возможный фазовый переход; инженерные особенности технических систем (различные теплоизолирующие материалы, сезонные охлаждающие устройства, используемые для термостабилизации грунта) и т.п. Разработанная модель, облачная среда и программный комплекс Wellfrost (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660988 от 4 декабря 2012 г.) был скорректирован по данным мониторинга за границей растепления ММП для технических систем (таких как добывающие и нагнетательные

скважины), который проведен ЗАО «Нордэко Евразия». Вычислительное ядро (пакет программ «Wellfrost»), входящее в облачную среду, с 2010 года было апробировано на 8-ми нефтегазовых месторождениях, расположенных в зоне вечной мерзлоты и показало точность около 5% при сравнении с экспериментальными данными. Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что для решения таких задач требуются мощные многопроцессорные ЭВМ и необходимо разработать дружественный интерфейс для проведения облачных вычислений для конкретного круга задач, среди которых могут быть и задачи, связанные с оценкой последствий изменения климата и другие важные задачи, связанные, например, с использованием геотермального тепла Земли (пакет программ «GeoTerm», на который было получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014616246 от 10.02.2014).

Постановка задач по моделированию тепловых полей в ММП.

В соответствии с работами [1-6] предложена модель для долгосрочного прогнозирования последствий, вызываемых освоением и эксплуатацией нефтегазовых месторождений, расположенных в зонах распространения ММП, а также и на арктическом шельфе. Разработаны новые методы по моделированию и изучению особенности деградации ММП на кустовых площадках, связанной с распространением трехмерных нестационарных тепловых полей в вечной мерзлоте от различных источников тепла (холода) с учетом климатических изменений, включая и солнечное излучение, а также и с учетом комплексного влияния всех инженерных объектов и технических систем, располагающихся на кустовых площадках северных нефтегазовых месторождений. Оптимальное расположение этих объектов на кустовой площадке позволит минимизировать влияние температурных воздействий на ММП, в том числе и за счет термостабилизации грунта, повысит безопасность эксплуатации нефтегазовых месторождений, будет способствовать охране окружающей среды и приведет к значительному сокращению финансовых затрат уже на стадии проведения проектных работ.

Новизна приведенных результатов заключается в том, что при моделировании поставленных задач на супер-ЭВМ учитывается максимальное число климатических, физических и техногенных факторов, влияющих на долгосрочные прогнозы, связанные с деградацией ММП от различных инженерных объектов (добывающих и нагнетательных скважин, охлаждающих устройств, факельных систем и т.п.), размещенных на кустовой площадке. В компьютерной реализации использованы собственные оригинальные методики «привязки» численных алгоритмов к географическим координатам местности, а также климатические базы, разработанные на основе открытых баз NASA, позволяющие существенно сократить задание исходных параметров для созданной облачной среды Wellfrost и облачных технологий проведения расчета.

В качестве основной математической модели для учета излучения от каждой скважины используется уравнение контактной (диффузионной) теплопроводности с неоднородными коэффициентами, включающее

локализованную теплоемкость фазового перехода – подход, позволяющий решать задачу типа Стефана, без явного выделения границы фазового перехода [7]. При этом теплота фазового превращения вводится с применением δ -функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость фазового перехода в коэффициент теплоемкости. Получаемая таким образом разрывная функция затем «распределяется» по температуре, и не зависит от числа измерений и фаз. Таким образом, моделирование процессов растепления в грунте сводится к решению уравнения

$$\rho c_v(T) + k\delta(T - T^*) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div } \lambda(T) \text{ grad } T \quad (1)$$

с учетом начального условия

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z). \quad (2)$$

где ρ – плотность [кг/м³], T^* – температура фазового перехода, $c_v(T) = \begin{cases} c_1, & \text{при } T < T^*, \\ c_2, & \text{при } T > T^*, \end{cases}$ – удельная теплоемкость [Дж/кг.К], $\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & \text{при } T < T^*, \\ \lambda_2, & \text{при } T > T^*, \end{cases}$ – коэффициент теплопроводности [Вт/м К], k – теплоемкость фазового перехода, δ – дельта-функция Дирака.

Остановимся более подробно на получении краевого условия на поверхности грунта, поскольку условие такого типа редко используется при решении рассматриваемых задач. В качестве граничного условия на поверхности грунта – основной зоне формирования естественных тепловых полей – используется уравнение баланса потоков, приносящих и уносящих энергию, с учетом основных климатических факторов: среднемесячной температуры воздуха и мощности солнечного излучения (в основном в весенние и летние месяцы). Составим тепловой баланс на поверхности грунта $z=0$. Имеем:

$q_1 = \alpha q$ – солнечная радиация, ушедшая на нагрев грунта;

$q_2 = b(T_{\text{air}} - T(t, x, y, 0))$ – теплообмен с воздухом;

$q_3 = \varepsilon \sigma (T^4(t, x, y, 0) - T_{\text{air}}^4)$ – излучение «черного тела»;

$q_4 = -\lambda \partial T / \partial z$ – теплоотдача за счет внутреннего теплового потока.

Баланс потоков $q_1 + q_2 = q_3 + q_4$ дает граничное условие на поверхности грунта:

$$\alpha q + b(T_{\text{air}} - T|_{z=0}) = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{air}}^4) + \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}. \quad (3)$$

Аналитических подходов для решения задачи (1)-(3) не существует. Приближенные численно-аналитические методы типа [8-11] при решении таких задач со сложными краевыми также не могут быть использованы.

Результаты численных расчетов по моделированию тепловых полей в ММП

В основу численной методики был заложен алгоритм, хорошо зарекомендовавший себя для нахождения тепловых полей от подземных трубопроводов [12-13], но с учетом специфики, связанной с возможными фазовыми переходами в грунте [1-7]. Используется конечно-разностный метод,

позволяющий использовать метод расщепления по пространственным переменным, для лучшей организации численных расчетов. В настоящее время известны следующие разностные методы решения задач типа Стефана: метод ловли фронта в узел разностной сетки, метод выпрямления фронтов, метод сглаживания коэффициентов и схемы сквозного счета. Метод ловли фронта в узел сетки применяется только для одномерных однофронтных задач, а метод выпрямления фронтов – многофронтных задач. Характерная особенность этих методов состоит в том, что разностные схемы строятся с явным выделением искомого фронта фазового превращения. Следует отметить, что методы с явным выделением неизвестной границы фазового превращения для случая циклического изменения температуры на границе не подходят, т.к. число немонотонно движущихся фронтов может быть несколько, при этом некоторые из них могут сливаться друг с другом или исчезать

На рис. 1 представлены результаты численных расчетов задачи (1)-(3) по нахождению тепловых полей в ММП от двух теплоизолированных скважин. Для решения таких задач разработана облачная среда [14-17] и удобный интерфейс, с помощью которого проводятся расчеты поставленных задач, используя мобильное устройство (например, мобильный телефон с Интернетом), связанное через сервер с супер-ЭВМ, на которой размещен комплекс программ Wellfrost. В результате удаленных расчетов можно получить необходимый набор данных для долгосрочного прогнозирования изменений в вечной мерзлоте, к которому также имеется доступ с мобильного устройства.

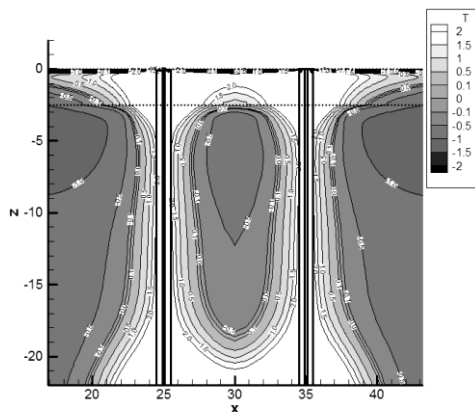


Рисунок 1 – Две изолированные скважины через 5 лет эксплуатации

Постановка задачи и расчеты по моделированию распределения температуры в пределах резервуара геотермальных вод.

Для описания функционирования геотермальной циклической системы (ГЦС), состоящей из двух скважин (добывающей – с горячей водой $T_2(t)$ и нагнетательной – с холодной водой $T_1(t)$) предложена трехмерная модель, опирающаяся на работы по подземной гидродинамике [18] течения жидкости в пористом грунте с учетом геотермального потока. Перенос тепла в такой системе будет осуществляться двумя способами: конвективным и диффузионным. Пусть $T=T(t,x,y,z)$ – распределение температуры в пласте в

момент времени t . Тогда уравнение для температуры в водоносном слое будет иметь вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} + b \left(\frac{\partial T}{\partial x} u + \frac{\partial T}{\partial y} v + \frac{\partial T}{\partial z} w \right) = \lambda_0 \Delta T, \quad (4)$$

которое нужно рассматривать совместно с уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{g\sigma u}{k}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{g\sigma v}{k}, \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{g\sigma w}{k} - g, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$b = \frac{\sigma \rho c_f}{\rho_0 c_0 (1 - \sigma) + \rho c_f \sigma}, \quad \lambda_0 = \frac{\kappa_0}{\rho_0 c_0 (1 - \sigma) + \rho c_f \sigma},$$

ρ_0 (ρ) – плотность грунта коллектора (воды), c_0 (c_f) – удельная теплоемкость грунта коллектора (воды), κ_0 – коэффициент теплопроводности грунта коллектора.

При решении уравнений (4)-(5) с соответствующими начальными и краевыми условиями требовалось оценить требуемое оптимальное расстояние между забоями нагнетательной и добывающей скважине с тем, чтобы температура добываемой воды не уменьшилась ниже заданной температуры, обеспечивающей рентабельность функционирования ГЦС.

После преобразований системы (5) для определения давления получается уравнение Лапласа

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (6)$$

с соответствующими условиями. Давление находится методом установления. Численная методика реализована на основе модели [19-21] в виде прикладного пакета программ «GeoTerm», на который было получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014616246 от 10.02.2014. Разработанный пакет программ также ориентирован на облачные технологии, которые были созданы при решении задач теплопереноса в ММП. На рис. 2 приведено распределение давления в геотермальном бассейне, соответствующего параметрам строящегося Ханкальского геотермального месторождения на Северном Кавказе.

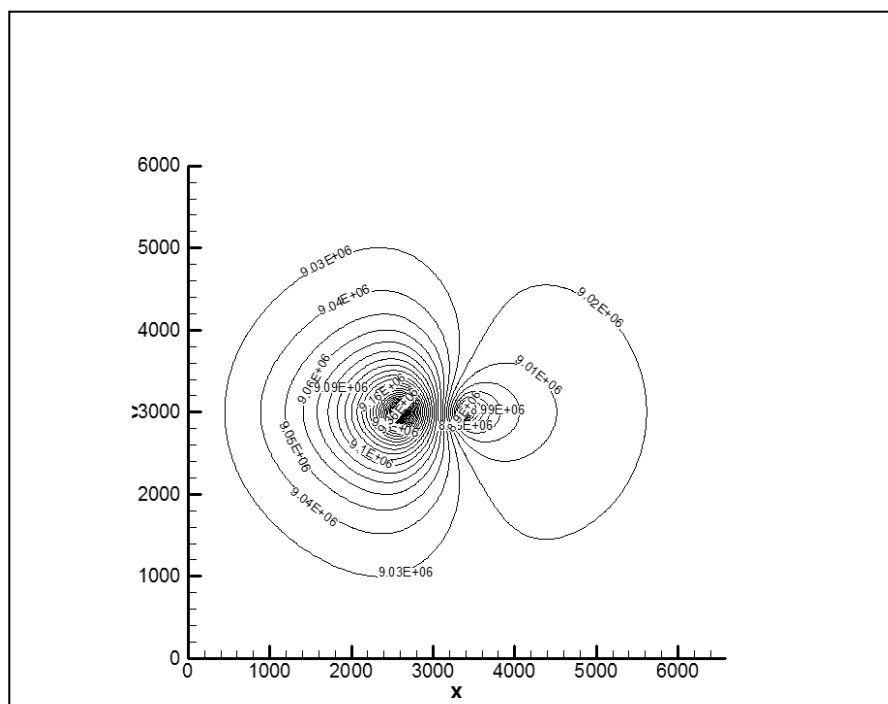


Рисунок 2 Поле давления

После нахождения давления определяется и распределение скорости фильтрующейся воды в продуктивном пласте. На рис. 3 приведено типичное распределение скорости в этом пласте.

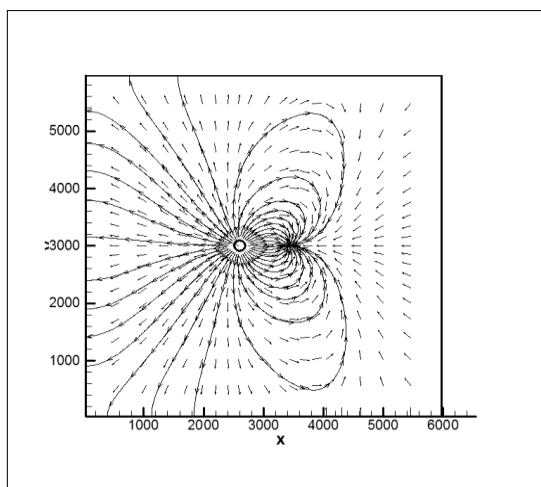


Рисунок 3 Поле скорости

После нахождения поля скоростей в зависимости от величины давлений на нагнетательной и добывающей скважине можно найти и распределение температуры в продуктивном слое. На рисунках 4 и 5 приведены температурные поля в продуктивном слое через 25 и 50 лет эксплуатации ГЦС.

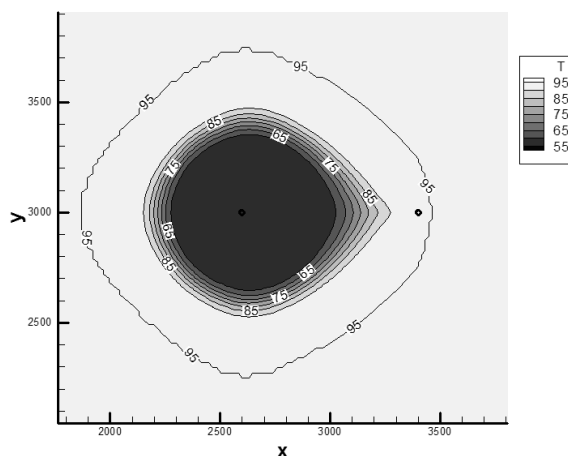


Рисунок 4. Температурные поля через 25 лет эксплуатации ГЦС

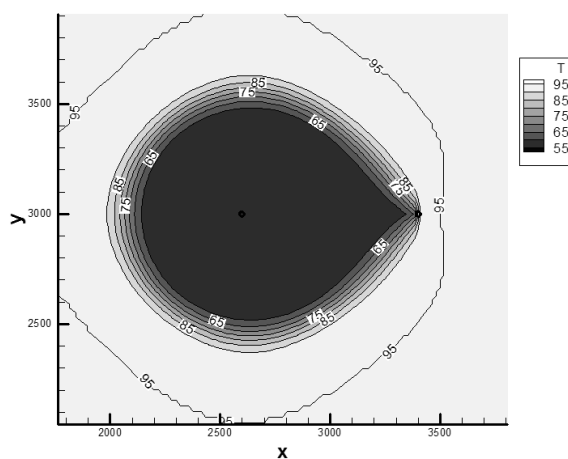


Рисунок 5 Температурные поля через 50 лет эксплуатации ГЦС

На рис.6 приведено изменение температуры воды в добывающей скважине при расстоянии между забоями нагнетательной скважины и добывающей скважине 800 метров.

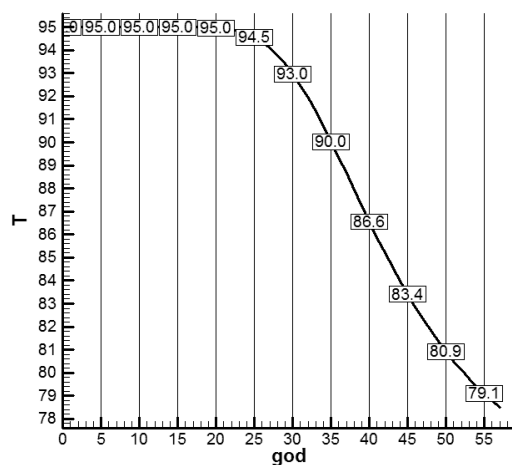


Рисунок 6. Изменение во времени температуры воды в добывающей скважине

Заключение

1). Для моделирования нестационарных трехмерных тепловых полей в приповерхностном слое от добывающих нефтегазовых скважин и различных инженерных объектов, расположенных в ММП, предложена математическая модель, учитывающая основные климатические (сезонное изменение температуры воздуха и интенсивность солнечного излучения), физические (теплофизические параметры грунта, его литологию и изменение температуры по глубине в разведочной скважине) и технологические (различные варианты теплоизоляции скважин, использование охлаждающих систем и т.п.) факторы.

2). Разработан и протестирован специальный облачный интерфейс, позволяющий пользователю, не являющемуся специалистом в области вычислительной математики, проводить удаленные расчеты на суперЭВМ, связанные с моделированием нестационарных тепловых полей в рассматриваемой сложной трехмерной области и определять интересующие параметры, необходимые для обустройства и безопасной эксплуатации северных нефтегазовых месторождений.

3). Разработанный комплекс программ был использован для разработки регламентов для восьми северных нефтегазовых месторождений и позволил уже на этапе проектирования сэкономить существенные средства. В 2012 году проведенные расчеты позволили сократить на 50% размер рабочих площадок для размещения устьев добывающих нефтяных скважин для Восточно-Уренгойского ЛУ Валажинской залежи.

4). Для описания функционирования геотермальной циклической системы, состоящей из двух скважин (добывающей – с горячей водой и нагнетательной – с холодной водой) предложена трехмерная математическая модель, опирающаяся на работы по подземной гидродинамике течения жидкости в пористом грунте с учетом геотермального потока.

5). Была проведена большая серия численных расчетов с использованием разработанного пакета «GeoTerm» и облачного интерфейса, упростившего анализ результатов численного моделирования функционирования опытно-промышленной Ханкальской геотермальной станции на Северном Кавказе. В ходе проведенной серии расчетов были определены оптимальные параметры строящейся геотермальной станции.

Работа поддержана грантами РФФИ 13-01-00800 и 14-01-00155.

Список литературных источников

1. Mikhail Yu. Filimonov, Nataliia A. Vaganova. Simulation of Thermal Fields in the Permafrost With Seasonal Cooling Devices // Proc. ASME. 45158, Volume 4: Pipelining in Northern and Offshore Environments; Strain-Based Design; Risk and Reliability; Standards and Regulations 133 (September 24, 2012). P. 133-141. (<http://doi: 10.1115/IPC2012-90287>).

2. M.Yu. Filimonov, N.A. Vaganova. Simulation of thermal stabilization of soil around various technical systems operating in permafrost // *Applied Mathematical Sciences*. 2013. Vol. 7. № 144. P. 7151-7160. (<http://dx.doi.org/10.12988/ams.2013.311669>).
3. Н.А. Ваганова, Филимонов М.Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // *Вестник НГУ. Сер. Математика, механика, информатика*. 2013. Т. 13. № 4. С. 37-42.
4. Mikhail Filimonov and Nataliia Vaganova. Prediction of changes in permafrost as a result technogenic effects and climate // *Academic Journal of Science*. 2014. 3(1). P. 121-128.
5. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Долгосрочное прогнозирование динамики зон оттаивания многолетнемерзлых пород в устье куста добывающих скважин // *Труды Всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар», посвященной 100-летию академика С.С. Кутателадзе*. 17-19 ноября 2014 г. Новосибирск. С. 42-48.
6. M.Y. Filimonov, N.A. Vaganova. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost for Northern Oil Fields Exploitation // *Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer-Verlag GmbH. 2015. (в печати).
7. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
8. Филимонов М.Ю. О представлении новыми конструкциями специальных согласованных рядов решений нелинейных уравнений с частными производными // *Вычислительные технологии*. 2001. Т. 6. № 3. С. 103-112.
9. Филимонов М.Ю. Применение метода специальных рядов для построения новых классов решений нелинейных уравнений с частными производными // *Дифференц. уравнения*. 2003. Т. 39. № 6. С. 801-808.
10. Vaganova N.A. Existence of a Solution of an Initial-Boundary Value Difference Problem for a Linear Heat Equation with a Nonlinear Boundary Condition // *Proc. Steklov Inst. Math.* 2008. Suppl. 1. P. S260-S271. DOI:10.1134/S0081543808050209.
11. M. Filimonov. Application of method of special series for solution of nonlinear partial differential equations // *AIP Conf. Proc.* 2014. 1631. 218. (<http://dx.doi.org/10.1063/1.4902479>).
12. Башуров Вл.В., Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // *Вычислительные технологии*. 2011. Т. 16. № 4. С. 3-18.
13. Nataliia Vaganova. Mathematical model of testing of pipeline integrity by thermal fields // *AIP Conf. Proc.* 2014. 1631. 37. (<http://dx.doi.org/10.1063/1.4902455>).
14. Филимонов М.Ю. Применение «облачных технологий» при проектировании и оценки надежности добывающих скважин на северных нефтегазовых месторождениях // *Развитие Арктики и приполярных регионов. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции*.

(Екатеринбург 15-16 мая 2014 г.). Екатеринбург: Издательско-полиграфический центр УрФУ. 2014. С. 197-200.

15. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Разработка программного обеспечения с использованием облачных технологий для комплексного моделирования и прогнозирования последствий долгосрочной эксплуатации добывающих скважин и различных технических систем, применяемых на северных нефтегазовых месторождениях // Морские информационно-управляющие системы. 2014. № 2(6). С. 26-33.

16. Ваганова Н.А., Васев П.А., Гусарова В.В., Игумнов С.Т., Филимонов М.Ю. Использование облачных технологий при моделировании эксплуатации северных нефтегазовых месторождений // Труды Института механики УрО РАН «Проблемы механики и материаловедения». Материалы конференции «Актуальные проблемы математики, механики, информатики». Ижевск, 3–5 марта 2014 г. Ижевск: ИМ УрО РАН. 2014. С. 23-28.

17. Берсенев А.Ю., Ваганова Н.А., Васев П.А., Игумнов А.С., Филимонов М.Ю. Кластерные вычисления как сервис на примере задачи моделирования тепловых полей от скважин на северных нефтегазовых месторождениях // Труды Международной конференции. «Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров». 2014. С. 147-151.

18. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М: Наука, 1977. 665 с.

19. N.A. Vaganova, M.Y. Filimonov. Simulation and Numerical Investigation of Temperature Fields in a Closed Geothermal System Exploitation // Lecture Notes in Computer Science. 2015. (в печати).

20. Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А. Моделирования распределения температуры в пределах резервуара геотермальных вод // Труды Института механики УрО РАН «Проблемы механики и материаловедения». Материалы конференции «Актуальные проблемы математики, механики, информатики». Ижевск, 3–5 марта 2014 г. Ижевск: ИМ УрО РАН. 2014. С. 219-222.

21. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Оптимальное проектирование геотермальных циклических систем // Всероссийская конференция Экология. Экономика. Информатика. (7-12 сентября 2014). Сборник статей. Т. 1. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета. С. 387-392.